マイクロマシン研究入門

——これからマイクロマシンを手がける人のために——

特集解説

I. マイクロマシンの研究テーマとアイデア

正員 藤田 博之 (東京大学)

1. はじめに

1987年に発表された、シリコン基板上の $100\mu\text{m}$ 程度のギヤやうず巻きばねなどの機械部品⁽¹⁾⁽²⁾から、いわゆるマイクロマシンの研究に関心が持たれるようになり、1988年の静電マイクロモータ⁽³⁾がそれに拍車をかけた。それから6年たった今、マイクロマシンの研究は、半導体工学に限らずいろいろな側面から行われるようになってきている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

マイクロマシンを作るという観点からみると、図1に示すように大別して三つのアプローチがある。一つは、上述の流れをくむ電気・電子工学からのもの、二つ目は従来の機械工学の手法を用いて機械を小型化しようとするもの、三つ目は生物の運動機構に着目し、分子構造そのものを使ってマシンを作り上げようとするものである。このような製作法という観点以外にも、材料、制御、システム構成、評価、設計、応用など種々の観点から考えると、マイクロマシンは極めて広範囲の分野に関係する総合技術である。

広い分野に関係する新しい研究トピックであるなら、数多くの研究者が研究を開始しそうなものだが、筆者の見たところ「関心はあるが、自分では手をつけていない」とやや傍観的立場をとる方が多いようである。この理由を推測すると次のようなことであろう。

(1) 半導体技術になじみがなく、どのような設備を使えばよいかわからない。

(2) マイクロマシンといっても、人によって定義すら違う漠然としたもので、何が問題点なのか、何をやったら良い成果があがるのかわからない。

このうち(1)については、本特集のもう一つの解説

図1 マイクロマシンへの三つのアプローチ

記事を参照されたい。本稿では(2)について扱う。現在マイクロマシン研究の課題と考えられていることを洗い出し、これから研究を始めようとする方々の参考に供したい。資料として1989年度に行った科研費総合研究Bのまとめの一部⁽⁶⁾と、筆者が本解説のため独自に行ったアンケートの結果を利用する。これらに基づいて、異なった専門分野の研究者が、マイクロマシンの発展と実現にどのように貢献していただけるかを考えたい。

2. 研究対象としてのマイクロマシン

研究テーマを探すには、まず対象を特定することが先決だ。本分野をマイクロマシンと名づけたのは東京大学先端研の藤正氏であり、端的でわかりやすいため広く用いられている。しかし、マイクロ「マシン」というと、直観的にSF映画「ミクロの決死圏」に登場したミクロの潜水艇や、人工のアリのようなマイクロロボットが連想される。これがテーマ探しの「つまづきの石」になってはいないだろうか。将来の夢は夢として、研究は、現在の技術の上に独創的なアイデアを加え、最前線を一步一步開拓していくものである。

Introduction to the Study of Micromachines—How to Begin the Research on Micro Electro Mechanical Systems—

1. Subjects of Study on Micromachines

By Hiroyuki Fujita, Member (The University of Tokyo)

キーワード: マイクロマシン, 半導体マイクロマシーニング, マイクロ理工学, 潤滑, 材料

図 2 マイクロ運動システムを実現するための課題例⁽⁶⁾

関連技術の現状と、本分野の将来の十全な発展のため 収め、現状では不可能な高機能を実現するデバイスも
には、「ミクロン程度以下の細かさの構造を高密度に しくはシステム」を目標に研究を進めるのが妥当だと

表 1 マイクロ理工学の研究課題アンケート結果

分 類	研究課題	関連分野 (研究アイデア)
プ ロ セ ス	欠陥導入した材料の選択エッチング プロセスのドライ化 制御された PVD 技術の確立 高アスペクト比のマイクロマシーニング エッチング面の鏡面仕上げ ドライエッチング用のエッチストップ ウェーハ温度制御によるドライプロセスの精密制御 高アスペクト比(50)の細孔(2~3 μm)加工 立体三次元構造の一貫作成技術 超細管の研磨・洗浄プロセス 積層接合したデバイスからの配線取り出し チップ状デバイスと流路の接続 常温接合 マイクロモールドニング 多品種少量生産・研究用マイクロマシーニング設備 シリコンダイアフラム厚のインプロセス制御 マイクロマシンによるマイクロマシンの組み立て シリコンと他の材料を組み合わせたときのプロセス技術 マイクロイオン銃や電子銃による薄膜プロセス	光応用 (光/レーザアシストエッチ) 集合体マイクロマシン 流体応用 マイクロマニピュレーション (ビーム加工)
マイクロ基礎	マイクロ/ナノトライボロジー 微小構造内での流体特性 マイクロ用材料の機械特性 アクチュエータ用機能材料 マイクロマシン用薄膜の熱的物性 低温での材料特性 ゴミの吸着機構と回避法	原子レベル加工, SPM マイクロトライボロジー, プロセス
バイオ材料	タンパク繊維の電気特性 タンパク質リングの滑らかさ 固定化タンパク質	マイクロトライボロジー
セ ン サ	プラズマ内各種パラメータ計測用マイクロマシン マイクロ力センサ 微小容量の検出	科学応用
アクチュエータ	昆虫の筋肉を用いたアクチュエータ トルク制御対応ミリサイズモータ 高出力ミリサイズリニアアクチュエータ 高出力のマイクロアクチュエータによる力/変位の増大 長ストローク・高トルクマイクロアクチュエータ 圧力を利用したアクチュエータ 浸透圧を利用したアクチュエータ	バイオ材料 ミニチュア機械 集合体マイクロマシン
エネルギー源	熱電変換素子のマイクロ化およびプロセス開発 電気的二重層コンデンサ 薄膜二次電池 環境エネルギーの吸収 電磁的エネルギーの伝送 光エネルギーの伝送	
マイクロマニピュレーション・ テレオペレーション	ナノマニピュレーションのための工具の開発 ナノマニピュレーションにおける臨場感の伝送 マイクロマシンの定位	原子レベル加工
評価・設計	マイクロマシン内部の微小温度分布測定 低温でのマイクロマシンの動作の評価 マイクロマシンの設計規格 マイクロマシーニングプロセス・シミュレータ 運動伝送メカニズムのシミュレーション	センサ プロセス
S P M	分子および原子レベルの動きの実時間観察法 SPM による高密度・大容量メモリー 光学的検出法によらない AFM	センサ 工業応用
光 応 用	立体光集積回路 光導波路デバイス用微小エッチドミラー	プロセス
流 体 応 用	フローセル一体構造の化学分析装置	

考える。当然この中には自律マイクロロボットも含まれるが、マクロな機械の心臓部にマイクロで高機能な要素が入っている形もありうる。このように対象を広げることで、実現の時期も早くなるし、用途もかえって多くなるだろう。

3. マイクロ理工学

上述したようにマイクロマシンをとらえると、極めて広範囲の研究テーマが考えられるようになる。図2は、このような研究テーマの分類を試みたもので、文献(6)に示した図に加筆した。材料とその加工法に始まって、要素デバイスとそのシステム化、更には応用をどこに求めるか、最後にマイクロの世界を支配する物理法則の探求や、以上の技術を体系化して望みのシステムをうまく造り上げるための設計法に至るまで、各種のテーマがある。総合的な学問分野であるから、マイクロ理工学と呼ぶのがふさわしいと考えている。

更に現在マイクロマシンの研究に関係している日本の研究者にアンケートを行い、日ごろ気にかかっているテーマを教えてくださいに示した。26名の方から総計67項目にわたる御返事をいただいた。表1はその回答を適当に分類して示したものである。回答のうち多かったのは、プロセスに関するテーマであった。半導体応用加工だけでなく、機械加工やビーム加工に関連するものもある。現在の研究が、どうやってマイクロの機械を作るかという点に集中しているため、どうしても問題意識が集中したものと思われる。

次いで多いのは、マイクロ基礎とセンサやアクチュエータのデバイス、エネルギー源などである。デバイスやエネルギー源の飛躍的進歩のためには、革新的材料が必要となる。たとえ組成は同じでも、薄膜化などのマイクロ化をしたとたんに、別の材料と考えて改めて研究する必要が生ずる。この意味で、マイクロ基礎の中でも、機能材料の重点的研究が望まれる。またバイオ材料も、手軽に適合性良く活用できるものを作っていくべきである。

制御の関係でも、マイクロマシンに対する関心が高いが、特に集合体マイクロマシン(たくさんのマイクロ要素を結合した集合体に役に立つ仕事をさせるもの)に興味をもつ方が多い。集積回路の成功の秘密も、単純なトランジスタを極めて多数つなぎ合わせて高い機能をもたせたことにある。数の多さが機能の質的な違いを生み出せるような、システムアーキテクチャや協調制御法の考案も望まれる。しかし、システムを考えると対象の選択には注意が必要であり、マイクロマシン自体が発展途上の現状では、より一般的で

抽象度の高い理論を目指すべきであろう。

設計や評価はほとんど手つかずの分野であり、実践的かつ包括的な研究が必要とされている。個々の研究者の手にあまる問題であり、共同の研究を組織することも考えられよう。

以上のテーマのように自分の研究実績を生かしてマイクロマシンの実現を目指すものもある。一方では、自分の研究分野での必要性から、マイクロマン技術を生かすという考え方もありうる。例えば、よく言われる医学の分野、光や流体の分野、またSPM(走査プローブ顕微鏡)のような科学実験ツールの分野などで、これぞマイクロマシンならではの皆が感心する応用を見つけていくことが大切である。

4. 研究体制と心がまえ

このように、多くの分野での専門知識が融合したところにマイクロ理工学が成立する。異分野がうまく融合するには、情報の流通の良いことと、皆が共同研究に積極的に参加することが大切であろう。またどのような方向から研究するにしろ、実際にマイクロマシンを作り、動かした経験があればテーマの取り組み方がより有効にできるようにし、また最終的には研究成果を実地に適用して有用性を検証する必要がある。このためには、多くの分野の研究者が一堂に会して、十分なプロセス設備を使いこなしながら研究ができる環境づくりが切望されている。

最後にマイクロマシンの研究の心がまえであるが、本分野は若く、評価も定まるとはいえない。この意味で多少のリスクは覚悟して、思い切って自分の専門分野から踏み出す勇気が必要である。そして研究目標を高く設定し、独創的で他人と桁違いのことを目指すならば、多くの輝かしい成果が得られることと確信している。末筆ながら、アンケートに御協力いただいた方々に深く感謝したい。(平成4年11月16日受付)

文 献

- (1) L.S.Fan, et al.: "Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-35, 724 (1988)
- (2) M.Mehregany, et al.: "Integrated Fabrication of Polysilicon Mechanisms", *ibid.*, ED-35, 719 (1988)
- (3) L.S.Fan, et al.: "IC-processed Electrostatic Micromotors", *Sensors & Actuators*, 20, 41 (1989)
- (4) 五十嵐・江刺・杉山・藤田: マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス(平3) 培風館
- (5) 藤田博之: マイクロマシンの世界(平3) 工業調査会
- (6) 原島・江刺・藤田, 編著: マイクロ知能化運動システム——マイクロマシンの工学的実現(平3) 日刊工業新聞社

[著者紹介は本部門誌 p. 987 をご参照下さい]